

## 第五章 褶皱作用

褶皱是地壳中最常见的一种地质构造。在前一章中已经对褶皱的几何形态方面的问题作了论述，它是研究褶皱的最基本内容。由于褶皱形成于广泛的物理条件范围、还可是多种应力状态下的产物。所以除对褶皱的几何学分析外，还要对褶皱的形成条件、应力状态、影响因素和发育过程等方面加以研究。

### 第一节 影响褶皱作用的因素

褶皱作用是较复杂的物理过程，它受到许多因素的影响和制约，其中主要是岩石力学性质和变形过程中的应力状态。

#### 一、褶皱岩石的物理性质

1. 同一褶皱构造中，由于岩层的成分及主要流变性质的不同而表现出不同的形态变化。
2. 岩层的层理、厚度以及强硬层和软弱层相叠置对褶皱作用影响很大。
3. 组成褶皱的岩系，在垂直于层面方向上岩性的均匀程度、岩层厚度变化以及岩层层间粘结程度对褶皱作用有很大影响。

#### 二、褶皱作用的受力方式

褶皱构造是地壳岩石中面状构造的变形结果。而引起变形的作用力方式是划分褶皱作用类型的主要因素。

1. 岩层受到顺层挤压力而形成褶皱的作用——纵弯褶皱作用；
2. 岩层受到垂直于层面的垂向挤压力而形成褶皱的作用——横弯褶皱作用；
3. 岩层沿着与层面垂直或斜交岩的一系列平行密集的剪切面发生差异性剪切滑动而形成褶皱的作用——剪切褶皱作用或滑褶皱作用。
4. 在固态流变条件下，由于物质粘性流动而形成褶皱的作用——柔流褶皱作用。

### 第二节 纵弯褶皱作用

概念：岩层受到顺层挤压而形成褶皱的作用称纵弯褶皱作用。

#### 一、单层褶皱的形成机制

##### 1. 主波长的概念：

岩层受顺层挤压作用发生弯曲形成褶皱有一个发育过程。在其受力之初或受力之前，岩层会出现一些正弦曲线状的微小起伏，随着力的不断作用与变形的发展，这些不同波长的起伏都有可能生长发育，但在一定范围内，只有某一初始波长的弯曲发育最好，波幅增长最快，它控制这褶皱的生长和发育，并最终形成褶皱的波长，这一初始波长就是主波长。

##### 2. 发生纵弯褶皱作用时存在两种阻力

- (1) 来自强硬层内部阻力，因强硬层弯曲时，必然产生使外弧拉伸、内弧受挤压的阻力；
- (2) 来自软弱物质层的阻力，因强硬层弯曲过程中，软弱物质力图阻止强硬层弯曲而产生阻力。

##### 3. 主波长公式

根据 Biot (1957) 的推导，主波长  $\lambda$  的公式为：

$$\lambda = 2\pi d \sqrt{\mu_1 / 6\mu_2}$$

式中： $d$ —强岩层的厚度， $\mu_1$ 、 $\mu_2$  分别为强岩层与介质弱岩层的粘度， $\mu_1 > \mu_2$ ，即：

- (1) 单层主波长与强硬岩层的厚度呈正比，即厚度大的强硬岩层形成的褶皱波长长，厚度小的强硬岩层形成的褶皱波长小。
- (2) 当强硬岩层的厚度一定时，初始主波长随着强、弱硬岩层粘度比的三次方根而变化。即：高粘度比形成肠状褶皱，而低粘度比形成短波长的尖—圆型褶皱，在二者之间存在过渡型褶皱。

## 二、多层岩层褶皱形成机制

### 1. 接触应变带的概念

夹于软弱岩层的强硬岩层发生褶皱时，其周围软弱岩层发生不同的效应，接近强硬岩层的软弱岩层，受到强硬岩层的影响而一起弯曲，远离强硬岩层时弯曲逐渐变弱而消失，这个范围称为接触应变带。

### 2. 强硬层间距对褶皱形态的影响

(1) 如果两强硬层相隔很远，超过了接触应变带的范围，则两层各自弯曲互不影响，每一层按照它与周围介质的粘度比，形成各自特征波长的褶皱。

(2) 如果两强硬层间距较小，位于相互的接触应变带之内，那么一个层的褶皱就会影响到另一个层的褶皱发育。

A. 如果各强硬层的粘度和厚度相同，整个岩系就形成协调褶皱；

B. 如果各强硬层的粘度和厚度不同，在褶皱过程中，每一层既要按照其与周围介质的粘度比及厚度形成本身的特征波长，又要受到系统中相邻层褶皱波长的影响。

## 第三节 纵弯褶皱作用的应变分析

### 一、单层岩石的纵弯褶皱作用

#### 1. 应变特点：

- (1) 变形作用仅仅包含在环绕着褶皱轴的弯曲作用。在理想情况下，平行褶皱轴的方向没有拉伸作用，整个褶皱的应变是平面应变。
- (2) 岩层中部有一个保持原面积不变的面，称中和面。中和面内各点均无应变。
- (3) 褶皱层在垂直层面的各处厚度不变，只是表现切向长度应变，使褶皱层的外弧伸长，而内弧缩短。{各点的应变椭球的压扁面在中和面外侧呈平行层面排列，而在中和面内侧则垂直层面成正扇形排列。}
- (4) 在褶皱作用前，原来与褶皱轴呈  $\theta$  角的直线线理，在褶皱过程中发生弯曲。在中和面上的线理与褶皱轴的夹角保持不变。中和面外侧褶皱面上的线理与褶皱轴夹角增大而内侧夹角缩小。

#### 2. 形成的小褶皱

- (1) 岩石韧性较大时，由于褶皱外弧受到拉伸而变薄，可能形成平行层面的劈理；褶皱内弧受到挤压而变厚，有时形成正扇形劈理，还可形成小褶皱。
- (2) 在岩石脆性较大时，由于外弧的拉伸而形成垂直层面的张破裂，甚至形成正断层；内弧受到挤压形成平行层面的张破裂，甚至逆断层。

### 二、多层岩石的纵弯褶皱作用

多层岩石的纵弯褶皱作用又可划分为两类：弯滑褶皱作用和弯流褶皱作用。

#### 1. 弯滑褶皱作用

##### (1) 概念：

在侧向顺层挤压力作用下，岩层沿层面剪切滑动而形成褶皱的作用，叫弯滑褶皱作用。

##### (2) 特点：

- a. 各单层虽然有中和面，但整个褶皱没有统一的中和面；
- b. 各岩层的厚度在垂直层面方向上保持不变，呈平行关系；
- c. 由于层间滑动，往往在转折端形成空隙——虚脱现象；
- d. 在层面上形成垂直于褶皱枢纽的擦痕，在褶皱翼部产生旋转剪节理和同心状剪节理、层间劈理和破碎带。

#### 2. 弯流褶皱作用

##### (1) 概念：

在顺层侧向挤压作用下，剪应变均匀分布于岩层中而引起岩层内部质点相对位移形成褶皱的作用，叫弯流褶皱作用。

(2) 特点:

- a. 剪切方向或物质流动方向是外弧部分相对于内弧部分向褶皱的转折端流动;
- b. 岩层的厚度在褶皱的各部位不变;
- c. 发生于脆性岩层之间的塑性层内, 形成层间小褶皱和反扇形劈理。
- d. 在褶皱正交剖面上, 最大应变轴方向从两翼向转折端收敛呈反扇形排列。应变强度与翼间角大小有关, 拐点处应变最强。
- e. 褶皱面与应变椭球的圆切面平行; 褶皱面上的原始直线线理与褶皱轴交角  $\theta$  在褶皱后仍保持不变。

#### 第四节 剪切、横弯和柔流褶皱作用

##### 一、剪切褶皱作用

###### 1. 概念:

剪切褶皱作用, 又叫滑褶皱作用, 是岩层沿着与层面不平行的细密的剪切面有规律地发生差异性剪切滑动而形成剪切褶皱作用褶皱的作用。

###### 2. 特征:

- a. 剪切方向不与岩层平行
- b. 剪切褶皱作用属于简单剪切变形, 剪切面是应变椭球体的圆切面, 褶皱中每一点上的应变都是平面应变。
- c. 剪切面平行于褶皱轴面, 属于相似褶皱。
- d. 在褶皱中任一剪切面上, 岩层各点的应变都相等, 而且没有中和面。
- e. 在褶皱轴面两侧的剪切面相对剪切方向是相反的;
- f. 在剪切褶皱作用中, 线理上各点都平行于滑动方向发生位移, 所以原来直线线理发生了变形, 变形的线理都位于线理的原始方位和滑动面所限定的平面上。

##### 二、横弯褶皱作用

###### 1. 概念:

横弯褶皱作用是岩层受到垂直于层面的垂向挤压力而形成褶皱的作用。

垂向挤压力可以是地壳的升降运动、岩浆的上拱作用、高塑性岩层的底辟作用。

###### 2. 特征:

- a. 横弯褶皱的岩层处于侧向拉伸状态, 所以组成褶皱的每一单层都不存在中和面;
- b. 在横弯褶皱的顶部拉伸作用最强, 使物质由顶部向两翼流动, 形成顶薄褶皱(IA 型)。
- c. 在褶皱的翼部形成轴面外倾的层间褶皱, 轴面与层面所夹锐角指向邻近层相对滑动方向。
- d. 由于拉伸作用, 在褶皱的顶部可能形成不同方位的张性断裂。

##### 三、柔流褶皱作用

###### 1. 概念:

在固态流变条件下, 由于物质粘性流动而形成褶皱的作用, 叫柔流褶皱作用。

###### 2. 特征:

- a. 发生柔流褶皱作用时, 岩石具有较高的韧性, 经常出现于变质岩和岩盐、石膏、煤层中。
- b. 在垂直剪切方向上物质变薄, 而平行剪切方向上加厚。

[注意与多次叠加褶皱的区别!]

#### 第五节 压扁作用

###### 1. 概念:

岩层在顺层挤压作用下, 在压应力方向上岩层均匀缩短及垂直应力方向上岩层均匀加厚的效应称压扁作用。

###### 2. 霍布斯等(1976)实验:

压扁作用在褶皱的发育不同阶段所表现的型式也不同。

a. 在褶皱发生之前, 物质成分均匀的岩层受到顺层挤压作用发生缩短变形。在垂直压应力方向上, 岩层均匀加厚。

b. 当岩层顺层压缩 20%左右时, 没有褶皱发育, 有弹性应变也有塑性变形。

c. 当缩短 20%~30%左右时, 褶皱开始发育, 岩层继续缩短。

d. 当压扁量达到 50%时, 褶皱层内各点应变椭球的长轴逐渐旋转到与轴面平行的方向上, 应变椭球体压扁面与褶皱轴面接近平行, 褶皱翼部岩层变薄, 转折端加厚。[开始发育的褶皱为 IB 型, 随着压扁作用而逐渐变为 IC 型褶皱, 甚至形成相似褶皱或顶厚褶皱。]

在褶皱发育后期, 在强烈压扁作用下, 在褶皱翼部, 软弱岩层中的强硬岩层受到垂直压缩方向上的拉伸作用而形成构造透镜体、石香肠和无根勾状褶皱, 软弱岩层可产生轴面面理。

3. 伴生的小型构造:

a. 在褶皱的翼部, 软弱厚岩层中夹有强硬薄岩层受到垂直压缩方向的拉伸作用, 形成构造透镜体、石香肠和无根钩状褶皱。

b. 在软弱岩层中产生轴面, 面理。

## 第六节 膝折作用

1. 膝折形成的有利条件:

- (1) 多发育在弹性或粘弹性材料中;
- (2) 岩性均一的脆性薄岩层;
- (3) 单层内部粘性较强, 而在互层中粘性差较大;
- (4) 层面上具有初始不规则。

2. 膝折形成的应力作用方式:

Johnson(1977)对膝折的形成进行了理论分析, 认为:

- (1) 共轭膝折带形成的应力状态是主压应力作用方向平行于层面;
- (2) 非对称共轭膝折带形成的应力状态是主压应力作用方向与层面斜交  $10^\circ$  ;
- (3) 单斜膝折带形成的应力状态是主压应力作用方向与层面斜交  $30^\circ$  。

另外, Johnson 通过对板岩的一系列实验发现, 膝折带的宽度随着围压的高低而变化。较宽的膝折带, 在 200 巴以下的低压下可发生, 但随着围压的增大, 膝折带的宽度也逐渐变窄。因此, 膝折带的宽窄也可以作为推断膝折作用深度的一种标志。

## 第七节 底辟作用

1. 概念:

底辟作用是指地下低密度高塑性物质(岩盐、石膏、粘土等)在静水压力影响下, 由下向上流动的作用。

由于这种作用使低密度高塑性物质上浮, 造成部分或全部穿切上覆岩层, 使上覆岩层拱起形成穹形的构造称底辟构造。

2. 形成的构造:

- (1) 在低密度高塑性物质中形成复杂的流褶皱;
- (2) 在围岩中形成穹窿构造、刺穿构造。在穹窿构造顶部出现环形和放射形张断层。